

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244027

研究課題名(和文)コヒーレント逆コンプトン散乱による大強度軟X線発生の原理実証

研究課題名(英文)Basic Research on Coherent Inverse Compton Scattering for High Power Soft X-ray Generation

研究代表者

鷲尾 方一 (Washio, Masakazu)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70158608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円、(間接経費) 10,470,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、我々が持つ、高品質電子ビーム発生装置、レーザーフォトカソードRFガンを用いて、総合的な研究を進めてきた。具体的には、電子ビームの空間・時間変換を可能とする、RFディフレクターキャビティーの実現と、そこへフィードを行う、マイクロ構造を持つ電子ビームの生成研究を行った。具体的には、ナノメートル加工技術を駆使し、簡易的に作成したマイクロスリットを用い、電子ビームの切り出し実験にも成功した。更にRFディフレクターを用いて空間・時間の変換についても成功し、マイクロビーム制御技術を確立、コヒーレントコンプトンに必要な基礎技術を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we have been carrying out the development of overall experimental and simulation studies by using our own Laser photo-cathode RF gun which is one of the best accelerators for achieving the purpose. One of the developments, we have studied the RF deflector cavity as the candidate for the converter of electron beam structure from thin beam in space to time domain. We have succeeded the development of micro-slit by applying the FIB technology to obtain the high aspect ratio structures. Finally, we have obtained micro-slit devices with the aspect ratio of 15 with the slit size is around 100 nm. We have demonstrated the micro-spacing electron beam by using micro-slits. Further, we have operated the RF deflector cavity for the space to time conversion of electron beam, and we have succeeded the establishment of the basic technology by controlling the micro-bunched electron beam using the developed technology for the realization of coherent Compton scattering.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：高品質電子ビーム 高輝度レーザー 空間・時間変調 逆コンプトン散乱 高輝度X線

## 1. 研究開始当初の背景

早稲田大学では、すでに BNL タイプのレーザーフォトカソード RF ガン(我々の RF ガンは、BNL 方式とよばれ、エミッタンス、ビーム時間幅、エネルギー幅などで極めて優れた性能をもつ。) の高度開発及び、システムの高度化実験を実施してきた。我々はこの装置を用いて、逆コンプトン散乱による軟 X 線発生を行うために必要なシステム高度化に向けた研究をすすめ、これまでに多くの成果を挙げてきている。すなわち、我々はすでに、電子ビームの徹底的な高品質化を行い世界最高レベルの超低エミッタンス電子ビームの発生に成功(鷲尾、The review of Laser Engineering, Vol.34, No.2 pp.148-153(2006)他)し、逆コンプトン散乱システムの高度化(K. Sakaue et al., Rad. Phys. Chem., 77 (2008) 1136)にも成功している。本研究において目指す「コヒーレント逆コンプトン散乱による大強度軟 X 線生成の実証」は、これまでの逆コンプトン散乱スキームではほとんど視野に入っていなかったが、我々は極めて高度な電子ビームの発生及び制御方法の開発を行なう事で、本研究開発が可能となるとの結論に達した。関連研究に目を向ければ、たとえば我々の共同研究の相手である米国 BNL では、RF ガンと CO<sub>2</sub> レーザーを高い精度で衝突させ、keV オーダーの高輝度 X 線発生を実現している。また産業技術総合研究所(つくば)においても我々と同様に逆コンプトン散乱システムの構築を行っているものの、このシステムも比較的高いエネルギーの X 線を利用したシステムとなっている。一方我々のグループにおいては、KEK との共同開発研究により世界最高輝度の X 線生成、短バンチ偏極ガンマ線生成に成功するという実績(T. Omori et al., Phys. Rev. Lett., Vol.96, 114801 (2006))をもつだけでなく、パルスレーザースーパーキャビティの実現により、マルチパルス X 線発生にも成功している(K. Sakaue et al. NIM to be published)。逆コンプトン散乱のコヒーレント化による高強度の軟 X 線領域の光子ビームの発生という新しい発想は、電子ビームの超低エミッタンス化と変調、レーザービームの制御技術、高度な衝突技術という 3 拍子揃った高度技術を蓄積している本グループのみが実現しうるユニークな研究課題であることを提唱している。

## 2. 研究の目的

本研究では、「コヒーレント逆コンプトン散乱による大強度軟 X 線発生の原理実証」を目的とし、小型高品質電子ビーム発生が可能なレーザーフォトカソード RF 電子銃からナノバンチ電子ビームを発生させ、更にそのビ

ームに対してレーザー電場による空間(時間)変調を行い、最終的に高輝度のレーザーとの衝突によりコヒーレントな逆コンプトン散乱の可能性を探り、得られる軟 X 線の強度を飛躍的に増大へと展開を図ることを目的として研究をすすめた。このスキームにおいてはナノバンチ内電子数(n)の 2 乗に比例したパワーのコヒーレント X 線発生が実現できる。このシステムが実現する事により従来では大型の施設でのみ可能とされていた、X 線の高度利用が比較的小さな組織でも円滑に行えるようになるだけでなく、科学技術の発展に大きなインパクトを与えることになる。

## 3. 研究の方法

本研究課題で最も重要となるマイクロ・ナノバンチ生成に関して検討を行った。自由電子レーザーに代表されるように整列されたマイクロ・ナノバンチからの放射は整列間隔に一致した波長でコヒーレントに増強される。マイクロバンチ生成手法として、空間的な変調をマイクロ構造によって電子ビームに施した後、高周波偏向空洞によって時間方向に入れ替える手法が最も実現性が高いと判断した。また、進行方向の長さが自然に圧縮される(バンチ後方の電子が速度が速く、前方が遅い状態を作り出す)電子バンチを用いることによってマイクロバンチの構造を圧縮し、初期の変調よりも 10 倍程度細かい変調として取り出すことが可能であることも確認した。これにより、1 $\mu$ m で空間変調をかけた自然圧縮される電子バンチを偏向空洞によって空間-時間方向変換をすることによって原理的に 100~200nm の時間方向変調(ナノバンチ)として取り出すことが可能となる。研究はマイクロ変調を施すための電子マスク開発・空間-時間変換のための高周波偏向空洞開発・自然圧縮電子バンチ生成のための高周波電子銃空洞開発をそれぞれ行い、評価した。

## 4. 研究成果

コヒーレント逆コンプトン散乱を実現するため、マイクロバンチ電子ビームを発生方法として①電子銃のから直接生成する方法、②電子ビームにエネルギー変調を与えたのちに密度変調へと変換する方法の 2 つの方法について検討を行った。

まず、陰極より直接マイクロバンチを生成する方法では、光陰極にレーザーパルス照射し光電効果により発生した電子にレーザー電場でエネルギー変調および密度変調を加える。初期条件はカソード温度 300K とした場合、電子の熱エネルギーは 13meV である。電子の引出電場勾配をそれぞれ 10MV/m と 100MV/m と仮定した場合、電子の熱拡散長はそれぞれ 11.5 $\cdot$ m、1.2 $\cdot$ m となる。この熱拡

散長が散乱に用いるレーザーの波長よりも長い場合には、カソードに照射するレーザーのエネルギー変調の効果がスミアされてしまうためマイクロバンチ構造をもった電子ビームを作り出すことはできない。通常の光陰極の電子銃の場合は光電効果によって電子を発生させるのに紫外光レーザー（例えば、Nd:YLF レーザーの4倍高調波262nm）を用いるが、上記の熱拡散長がこの波長よりも長いために、直接カソードに照射するレーザーで電子ビームにより密度変調を与えることは困難である。これを克服するためには光陰極の表面電場を400MV/m以上にすると、高い加速電場を実現するための直流高電圧印加電子銃や高周波電子銃の検討も行なったがその実現は難しいという結論に至った。その他の解としては、仕事関数の小さな陰極材を用いるという可能性があるが、これについても可視光～赤外光で電子を発生できる光陰極材料の更なる研究が必要である。

次に、上記の熱拡散エネルギーを持った電子ビームを陰極より発生させ、ビームにエネルギー変調を与えた後に密度変調へと変換するマイクロバンチ生成法についての研究について述べる。エネルギーが $\gamma$ と $\gamma + \Delta\gamma$ である2つの電子がドリフト距離Lを進む間に生じる縦方向変位は

$$\Delta z = L \cdot \Delta\gamma / \gamma^3 \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$$

で表すことができる。L、 $\gamma$ 、 $\Delta\gamma$ が1m、100keVと13meVとしたとき縦方向変位( $\Delta z$ )は27nmとなる。これより、初期の熱エネルギー分散(13meV)以上の変調を加えることで効果的にバンチングをすることができる事が分かる。我々は、エネルギー変調方式に金属スリットを使う方法について電磁場計算を行い評価を行なった。この方法ではレーザーの電場を使い電子ビームにエネルギー変調を与えるものである。

エネルギー変調するレーザーのウエストサイズ(幅)を $\Delta_w$ としたとき、変調エネルギーは

$$E_{mod} = \sqrt{2\pi\sigma_w} E_z(z, 0) \cdot e^{-k^2 \sigma^2 / z\beta^2}$$

から求まる。ここで、kは波数、 $\beta$ は電子の速度である。この式からも明らかのように $\sigma_w$ はレーザーの波長以下にする必要があり、 $\beta$ が小さい非相対論的電子ビームに対してバンチングは有効に行われることがわかる。金属スリットを用いた方法では、CO<sub>2</sub>レーザーを波長の1/4スリット隙間に照射しその隙間間に変調電場を生成することとした。この方法の利点としては、金属スリットを用いることでレーザーの安定性などに依存せず安定した変調電場生成が可能であり、波長10.6 $\mu$ mのCO<sub>2</sub>レーザーを使うため金属スリットの加工も比較的容易である。次に、CO<sub>2</sub>レーザー(10.6 $\mu$ m)をXバンドRF(11.4GHz)に

仮想し、金属微小隙間( $\lambda/4$ )に変調電場が生成されているか電磁場コードを使い解析した。金属スリット隙間に対して垂直な電場方向でRFを入射することにより、効率良く金属スリット隙間に変調電場を生成できることが分かった。計算と同様のセットアップを使いループで電磁場分布を測定し、電磁場解析コードを用いた計算とほぼ同様の結果が得られた。しかし、入射導波管と金属スリット間に測定用のプローブを挿入することでインピーダンスマッチングが変化し精度の良い測定ではなかったと言える。その他、金属スリットからの距離に対して指数関数的に変調電場強度が減少するため、電子ビームは金属面に対して平坦に整形する必要がある。空間電荷効果を含めない1次元の粒子軌道計算により、金属スリット方式(スリット幅= $\lambda/4$ )で100keVの単一エネルギーの電子ビームをCO<sub>2</sub>レーザーの波長の周期にマイクロバンチ化できることを明らかにすることができた。本研究の結果として、コヒーレント光発生に必要な不可欠なマイクロバンチ生成の1つの方法として金属スリット法を提案し、1次元粒子計算によりマイクロバンチ生成が可能であることを確認することができた。

更に、コヒーレント・コンプトン散乱実現のための電子ビーム変調に関して、空間領域変調を時間領域変調に圧縮変換する手法に関してコードPARMELAによるビームトラッキングシミュレーションを実施した。具体的には、まずフォトカソードRF電子銃からの約4MeVの電子ビームを2本の定在波加速管によって約30MeVまで加速を行うことを想定した。その際、電子ビームのエネルギー分布がチャープするように加速管の位相を制御する。エネルギーチャープした電子ビームに対して、アクロマティックアーク(2個の偏向電磁石、4個の四極電磁石)の中心部に設置したマルチスリットによって水平方向変調を行う。さらに、アクロマティックアーク出口において、空間領域から時間領域に変換する。マルチスリットは、0.5mm幅、2.0mm間隔で、ビーム中心軸から $\pm 10$ mmを切り出す仕様とした。アクロマティックアークにおける磁場設定は、時間圧縮も考慮した圧縮モード(R56が負)である。計算の結果、エネルギー分散によってX方向に広げられ、スリットにより切り出されることが分かった。またアーク直後の時間分布を調べると、スリットにより、中心付近では約1/50(約10 $\mu$ m)に空間領域を時間領域に圧縮変換できることが分かった。また、アクロマティックアーク内で、電子ビームの2次、3次の分散により位相空間分布の裾野が広がるため、均等圧縮をするためには、マルチスリットのスリット間隔等を変調させる必要があることが分かった。本研究により、分散補償と最適なスリット形状を算出することで $\mu$ mオー

ダーの変調が実現でき、更にスリットの微細化を行うことで、最終的にコヒーレント・コンプトン散乱に必要な、nm オーダーの変調が可能であることが検証された。

次に、実験的に実施した各種開発校も p 苦について述べる。マイクロ構造を持った電子マスク開発としては、FIB(収束イオンビーム)やリソグラフィ技術による検討を行った。構造体としてはマイクロサイズのため、パターンニングに困難はないが、高エネルギー電子ビームに濃淡をつける必要があるため、非常に高アスペクトなマスクが必要であった。これらを総合的に評価し、アスペクト比 100 を超える非常に高精度なマスクの制作に成功した。高周波偏向空洞として求められる性能としては、進行方向と空間方向を精度よく入れ替えるとともに、空間方向濃淡をできるだけそのまま進行方向濃淡に変換することが求められる。言い換えれば、偏向空洞では完全に入れ替えを行うわけではなく、バンチにある角度の偏向を持たせることで変換される。この偏向角が大きければ大きいほど空間方向の濃淡をそのまま転写することが可能である。そのような偏向空洞の設計・製作を行い、少ない高周波パワーで大きな偏向角の実現できる空洞の製作ができた。(図 1 参照)

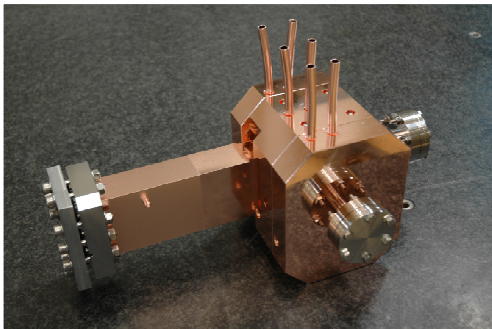


図 1 : 製作した高周波偏向空洞の写真

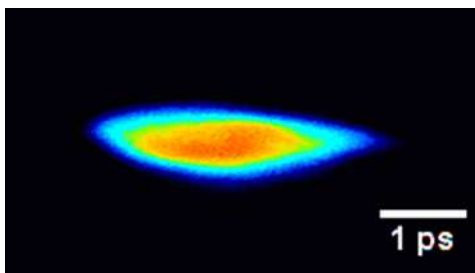
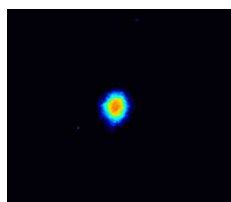


図 2 : 偏向した電子バンチ(上 : 偏向前、下 : 偏向後)

実際にビーム試験を行うことで、偏向角 70 度以上の達成を確認した。(図 2 参照)これは 1mm の変調を 1.06mm の進行方向変調に変換することが可能であることに相当する。

自然圧縮電子バンチ生成には我々のグループが考案したエネルギー変調セル付属型高周波電子銃を用いる。この電子銃は電子バンチのエネルギーを非常にきれいに線形に変調できる構造となっており、これによって前方電子に低エネルギー、後方電子に高エネルギーを与えられるようになっている。このような電子バンチはその速度差によって距離を進行するごとに圧縮される。圧縮される前に空間変調をかけておき、その後圧縮地点においてナノバンチが生成されることとなる。実際に最適設計を行い、バンチ長を圧縮部において計測することにより、もともと 4ps のバンチが 323fs まで圧縮できることを確認した。

これらの開発したコンポーネントを組み合わせることで、ナノバンチの生成が可能であることにめどをつけることに成功した。すべての非常に重要なコンポーネントが成功裏に開発できたことで、ナノバンチの実

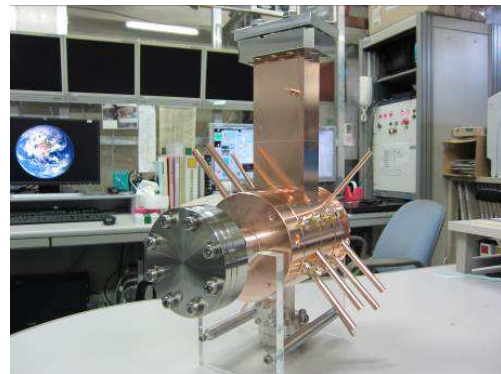


図 3 : 製作したエネルギー変調セル付属型高周波電子銃

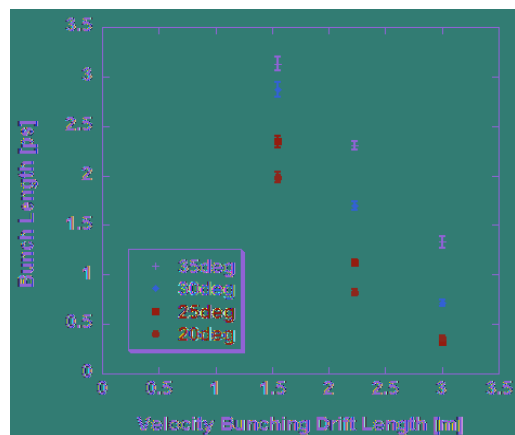


図 4 : 自然圧縮電子バンチの圧縮確認試験結果。測定点では 1.5m の位置で 2.5ps 程度のバンチ長が 3m の位置で 323fs まで圧縮されていることがわかる。



現が可能となったと考えている。ただし、ナノバンチは生成されても検出・実証することが非常に困難であり、現時点での最終的な計測には至っていない。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 43 件)

1. Ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell attached rf gun, Kazuyuki Sakaue, Yuya Koshihara, Masataka Mizugaki, Masakazu Washio, Toshikazu Takatomi, Junji Urakawa, Ryunosuke Kuroda, Phys. Rev. STAB. 17, 023401, 2014 (査読有)
2. K-edge imaging with quasi-monochromatic LCS X-ray source on the basis of S-band compact electron linac, R. Kuroda, Y. Taira, M. Yasumoto, H. Toyokawa, K. Yamada Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B in press (査読有)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.01.034>
3. Fabrication and low-power RF test of C-band RF gun, Y. Taira, R. Kuroda, M. Tanaka, H. Kato, R. Suzuki, H. Toyokawa, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B in press (査読有)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.12.037>
4. The high-power operation of a terahertz free-electron laser based on a normal conducting RF linac using beam conditioning”, Keigo Kawase, Ryukou Kato, Akinori Irizawa, Masaki Fujimoto, Shigeru Kashiwagi, Shigeru Yamamoto, Fumiyoshi Kamitsukasa, Hiroki Osumi, Masaki Yaguchi, Akira Tokuchi, Shoji Suemine, Goro Isoyama, Nucl. Instr. Meth. A, 726 (2013)

96-103 (査読有)

5. 1ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photocathode Radio Frequency Gun and Superconducting Accelerator, Masao Kuriki, Hokuto Iijima, Seiichi Hosoda, Ken Watanabe, Hitoshi Hayano, Junji Urakawa, Goro Isoyama, Ryukou Kato, Keigo Kawase, Ayaka Kuramoto, Shigeru Kashiwagi, and Kazuyuki Sakaue, Japanese Journal of Applied Physics 52 (2013) 056401 (査読有)  
<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.056401>
6. Method of predicting resist sensitivity for 6.x nm extreme ultraviolet lithography, Tomoko Gowa Oyama, Akihiro Oshima, Masakazu Washio, Seiichi Tagawa, J. Vac. Sci. Technol. B 31(4), Jul/Aug 2013 041604- 1-5, (査読有)  
[doi.org/10.1116/1.4813789](http://dx.doi.org/10.1116/1.4813789)
7. First refraction contrast imaging via Laser-Compton Scattering X-ray at KEK”, K. Sakaue, T. Aoki, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, N. Terunuma, J. Urakawa, AIP Conf. Proc. 1466, pp. 272-277, 2012 (査読有)
8. Design of high brightness laser-Compton source for EUV and soft X-ray wavelengths, Kazuyuki Sakaue, Akira Endo, Masakazu Washio, SPIE Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS (JM3) 11(2), 021124-1-7, 2012 (査読有)
9. Design of high brightness laser-Compton source for extreme ultraviolet and soft x-ray wavelengths,

Kazuyuki Sakaue, Akira Endo and Masakazu Washio, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 11(2), 021124 (Apr–Jun 2012), (査読有)  
DOI: 10.1117/1.JMM.11.2.021124

[学会発表] (計 44 件)  
国際会議

1. Development of longitudinal profile monitor for ultra-short electron beam using EO sampling method, R. Kuroda et al., FEL2013, New York, 27 August (2013)
2. Status of Upgrade Project of the 1.2 GeV Booster Synchrotron at Tohoku University, F. Hinode, H. Hama, S. Kashiwagi, T. Muto, I. Nagasawa, K. Nanbu, Y. Shibasaki, K. Takahashi, Proc. of IPAC'13, (Shanghai, China, 2013), pp.151-153.
3. Development of quantum radiation sources using S-band compact electron linac at AIST, R. Kuroda, Asian Core Workshop 2013 (2013) Dejon, Korea
4. Multi-bunch Beam Generation by Photo-cathode RF Gun for KEK-STF, M. Kuriki, S. Hosoda, H. Iijima, A. Ayaka, H. Hayano, J. Urakawa, K. Watanabe, G. Isoyama, R. Kato, K. Kawase, S. Kashiwagi, K. Sakaue, Proc. of IPAC'12, (New Orleans, USA, 2012), pp.1479-1481.
5. Progress in Reducing the Back-bombardment Effect in the ITC-RF gun for t-ACTS Project at Tohoku University, X. Li, H. Hama, F. Hinode, S. Kashiwagi, M. Kawai, T. Muto, K. Nanbu, Y. Tanaka, Proc. of IPAC'12, (New Orleans, USA, 2012), pp.643-645.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
鷺尾方一 (Washio Masakazu)  
早稲田大学理工学術院・教授  
研究者番号：70158608

(2) 研究分担者  
坂上和之 (Sakaue Kazuyuki)  
早稲田大学理工学術院・助教  
研究者番号：80546333

研究分担者  
柏木 茂 (Kashiwagi Shigeru)  
東北大学 電子光理学研究センター・准教授  
研究者番号：60329133

研究分担者  
黒田隆之助 (Kuroda Ryunosuke)  
産業技術総合研究所・主任研究員  
研究者番号：80546333